

Alignement et optimisation d'un simulateur solaire d'une configuration 1SC à une configuration 10 SC.

D. Derauw⁽¹⁾, E. Mazy⁽¹⁾, A. Popovitch⁽²⁾, Y. Stockman⁽¹⁾

*(1) Centre Spatial de Liège
Avenue du Pré Aily, 4031 Angleur – Liège, Belgique*

*(2) ESA - ESTEC
P.O. Box 299, 2200 AG, Noordwijk, Nederland*

1. Introduction :

Ce papier décrit les tâches réalisées dans le cadre d'un projet de modification du simulateur solaire de l'ESA afin de l'adapter et le faire passer d'une configuration où le flux est de une constante solaire vers une configuration à 10 constantes solaires.

Nous exposons les tâches réalisées par le Centre Spatial de Liège en ce qui concerne la modélisation et la simulation des configurations ainsi que les éléments mis au point pour l'alignement des miroirs du simulateur solaire et pour la mesure d'uniformité de flux.

2. Description du projet

Le Centre Européen de Recherche et Technologies Spatial (ESTEC) de l'Agence Spatiale Européenne dispose de différentes facilités afin de permettre certains tests de charges utiles en ambiance spatiale.

Parmi ces différentes facilités se trouve un simulateur de très grande taille, le LSS (Large Space Simulator), contenant lui-même un simulateur solaire. Ce dernier permet de mettre des charges utiles complètes en vide thermique pour notamment tester et évaluer les points chauds ainsi que les réflexions multiples sur les différentes surfaces du satellite considéré. Ce simulateur est constitué d'une source, elle-même composée d'un ensemble de 19 lampes Xénon et d'un ensemble de lentilles elliptiques jouant le rôle de concentrateur qui envoie un faisceau sur un miroir sphérique de 6 mètres de diamètre. Ce miroir est lui-même constitué de 121 éléments hexagonaux ayant un rayon de courbure de 30m. L'ensemble constitue un collimateur qui envoie un faisceau de 6m de diamètre avec une intensité d'une constante solaire sur la charge utile à tester (fig. 1.).

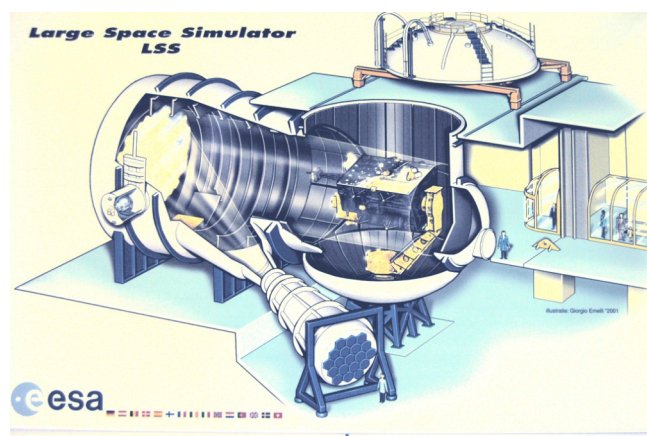


Figure 1 : Schéma d'implantation du LSS

Une des prochaines missions scientifique de l'ESA concerne un satellite nommé Bepi-Colombo qui aura pour objectif de se mettre en orbite autour de la planète Mercure afin d'observer cette

dernière. Mercure étant plus proche du soleil que notre Terre, ce satellite devra faire face à un éclairement de 10 constantes solaires au lieu d'une, comme c'est le cas pour les satellites en orbite terrestre. Dès lors, afin d'effectuer les tests requis, l'ESA se doit d'adapter le simulateur solaire du LSS pour permettre un éclairement de cette intensité sur la charge utile. La contrainte étant d'obtenir un faisceau de 10 SC de 3m de diamètre dans le plan de travail avec une uniformité de flux meilleure que 5%.

L'option retenue pour arriver à ce niveau d'éclairement consiste à modifier l'orientation des 121 éléments du miroir afin de parvenir à 10 constantes solaires dans le plan de travail sur un diamètre de 3 mètres [1].

La mise au point du système d'alignement des éléments des miroirs et du système de mesure de l'uniformité de flux ont été confiés au Centre Spatial de Liège qui a travaillé en collaboration avec la société PHOTOPTIM pour les aspects liés à l'optimisation des alignements.

Le travail réalisé a été segmenté en trois tâches :

Une tâche de modélisation de la facilité sous ASAP™

Une tâche de réalisation technique du système d'alignement et de mesure.

Une tâche de réalisation du logiciel d'optimisation et de contrôle.

Les deux premières tâches étaient de la responsabilité du CSL.

La modélisation ASAP™ a permis de déterminer que la configuration optimale du miroir était une configuration torique afin d'atteindre l'intensité et l'uniformité de flux requise dans le plan de travail. La modélisation a également permis d'obtenir les rotations théoriques à imposer à chaque élément hexagonal du miroir.

La seconde tâche a consisté à mettre au point et à développer le système d'alignement des miroirs ainsi que le système de mesure et de contrôle du flux.

Le système d'alignement des miroirs est constitué d'un écran de cinéma suspendu dans le plan de travail, d'une caméra d'observation placée hors axe à côté du miroir et d'un laser placé au niveau de la source du simulateur. Le principe consiste à pointer chaque segment du miroir successivement avec le laser, d'observer la tache laser réfléchie sur l'écran, puis de modifier l'orientation du segment de miroir considéré afin que la tache laser arrive à la position relative pré-déterminée par la modélisation ASAP.

Le système de mesure de flux utilise les mêmes éléments : l'éclairement de l'écran par le simulateur solaire est observé par la caméra afin d'en déduire l'uniformité de flux.

La troisième tâche a consisté à développer le logiciel de contrôle. Celui-ci gère toutes les acquisitions caméra afin d'observer les positions de départ et d'arrivée de la tache laser lors de l'alignement des segments de miroir. Lors de la séquence de mesure de flux, le logiciel gère également les acquisitions d'images et les mesures d'uniformité de flux.

Enfin, le corps du logiciel contient un module d'optimisation utilisant les fonctions de réponse des segments de miroirs tels que modélisé par ASAP™ afin d'affiner les valeurs d'alignement des miroirs pour atteindre l'intensité et l'uniformité requise dans le plan de travail.

Nous présentons ici les différentes étapes de ce projet, les réalisations et mises au point in situ.

3. Modélisation ASAP

La première étape du projet a consisté en la modélisation de la facilité afin de déterminer les rotations théoriques à appliquer aux différents segments du réflecteur afin d'atteindre 10 constantes solaires de manière uniforme dans un disque de 3m de diamètre au niveau du plan de travail de la facilité.

Le modèle du LSS a été développé pour le logiciel de ray-tracing ASAP 2008. Le schéma optique modélisé est représenté à la figure 2. Le réflecteur est constitué de 121 segments hexagonaux ajustés afin d'offrir une ouverture de 7,2m de diamètre. Chaque segment est défini comme étant un miroir sphérique ayant une ouverture hexagonale et un rayon de courbure de 30m.

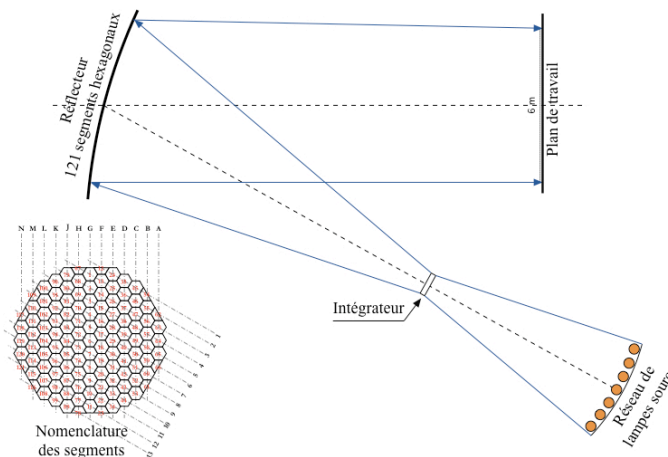


Figure 2 : Schéma optique du simulateur solaire et nomenclature des segments constituant le réflecteur

Le modèle permet d'orienter les segments de manière à définir une forme toroïdale du réflecteur en définissant deux rayons de courbure. Dans la forme nominale du réflecteur, ces deux rayons de courbures sont égaux et valent 30m.

Le plan de travail est défini comme un disque de 8m de diamètre placé à 17m du vertex du réflecteur.

La source est constituée d'un ensemble de 19 lampes au xénon éclairant un intégrateur constitué de 55 couples de lentilles (lentilles de projection et lentilles de champs) afin d'uniformiser au mieux le flux incident. De cette manière, chaque lampe éclaire l'intégralité du réflecteur. La figure 3 montre l'éclairement obtenu par une seule lampe sur un écran placé au niveau du plan de travail de la facilité telle qu'observée de l'arrière du réflecteur. On peut voir sur la droite la sortie de l'intégrateur. La modélisation de la source tient compte du schéma optique des lentilles de projection et des lentilles de champ.

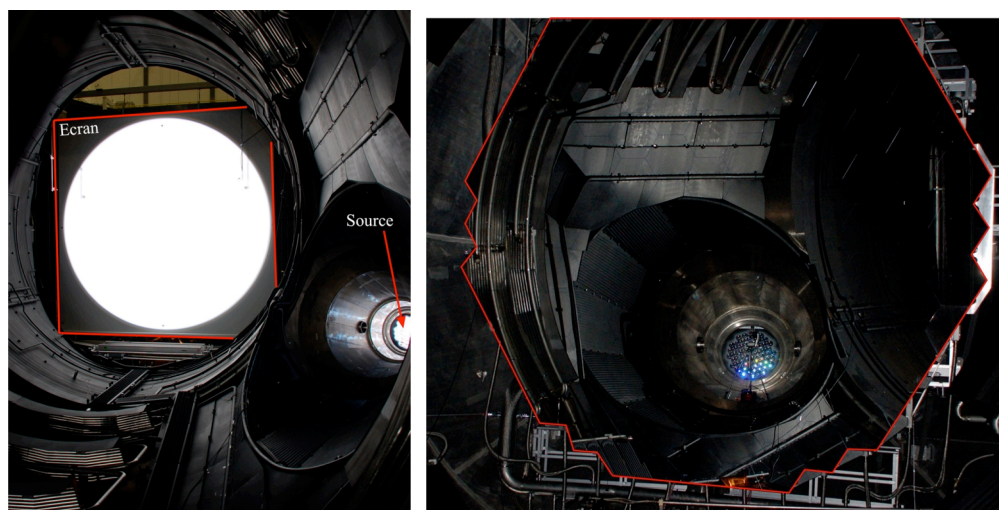


Figure 3 : A gauche : Vue de l'éclairement obtenu par une lampe sur un écran placé dans le plan de travail du LSS. La sortie de l'intégrateur de la source est visible à la gauche de la figure.
A droite : vue du réflecteur à partir du plan de travail montrant en réflexion la sortie de l'intégrateur.

Afin de vérifier l'exactitude du modèle, l'irradiance théorique a été calculée pour le réflecteur en situation nominale (Rayon de courbure de 30m) et comparée avec l'irradiance mesurée in situ à l'aide d'une cellule balayant l'ensemble de la zone de travail. Le résultat comparé est montré à la figure 4. La

simulation et la mesure montrent toutes deux une forme circulaire avec un gradient oblique identique. La différence de niveau globale est imputable au fait que le modèle ne tient pas compte des baffles ou autres parties mécaniques de la facilité qui peuvent vignetter le faisceau.

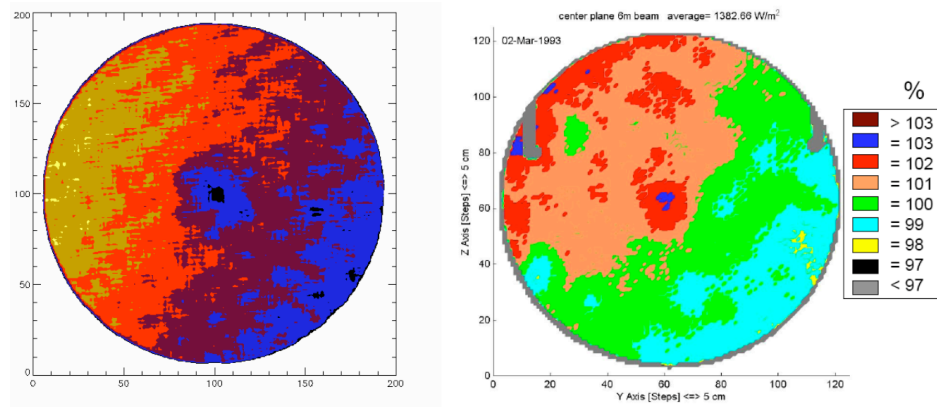


Figure 4 : Comparaison entre irradiance simulée et mesurée

Le modèle étant validé, il a été utilisé afin de calculer les rotations à appliquer à chaque segment du réflecteur pour que celui-ci permette d'obtenir l'éclairement requis de 10 constantes solaire dans un diamètre de 3m au niveau du plan de travail. L'optimisation implique des rotations des segments menant à un réflecteur torique avec pour rayons de courbure de 22,3 et 21,3m.

Dans la pratique, le modèle permet de calculer les courbures à imposer au réflecteur afin d'obtenir un faisceau d'un diamètre ou d'un éclairement donné dans le plan de travail. De plus, le modèle permet de calculer l'irradiance spatiale en tout plan de la facilité dans un intervalle de +/-2,5m de part et d'autre du plan de travail ainsi que la distribution angulaire de l'irradiance en tout point.

4. Alignement des segments

La modélisation de la facilité et les calculs d'optimisation donne pour chaque segment les valeurs des rotations à appliquer. Afin de pouvoir appliquer ces rotations à chaque segment, le système d'alignement suivant a été mis au point (figure 5) :

- Un écran de cinéma de 7mx7m suspendu dans le plan de travail de la facilité.
- Un trépied supportant un laser placé sur une monture motorisée est placé au niveau de la sortie de l'intégrateur. Ce système permet, à partir d'une télécommande, de pointer le laser sur le centre de chaque segment consécutivement. Le faisceau laser est réfléchi par le segment considéré et projette un « spot » au niveau de l'écran.
- Une caméra d'observation placée au niveau du réflecteur et permettant de visualiser l'entière du champ éclairé par le simulateur solaire.

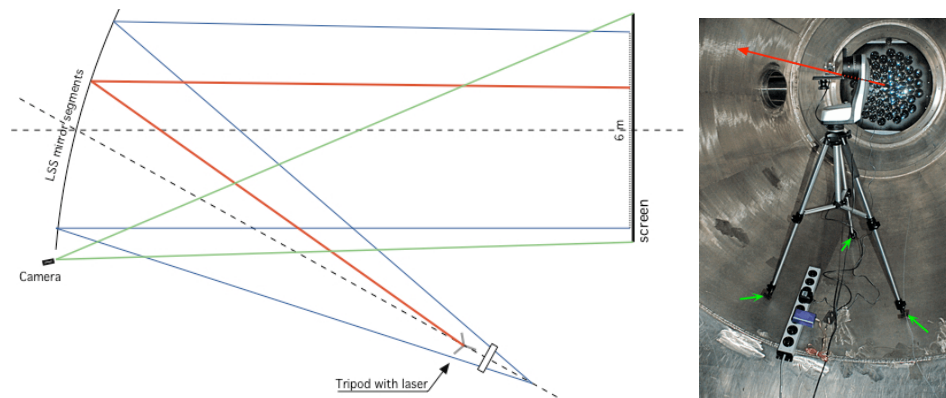


Figure 5 : A gauche : Schéma du système d'alignement
A droite : trépied et monture motorisée supportant le laser de pointage

Le principe d'alignement consiste à pointer le laser au centre du segment à aligner et à observer la position du spot sur l'écran. Cette position est visualisée par la caméra et enregistrée par le logiciel de contrôle. Le logiciel marque d'une cible sur l'image le centre du spot laser. Les angles en élévation et en azimut à appliquer au segment considéré sont converti en déplacements latéraux et verticaux au niveau de l'écran et une seconde cible est positionnée sur l'image de manière à pointer la position à laquelle le spot laser doit arriver en fin d'alignement. Ensuite, l'opérateur placé à l'arrière du réflecteur et muni d'un portable équipé du logiciel de contrôle agit sur les vis de réglages du segment considéré afin d'amener le spot laser à la position ciblée sur l'image et correspondant à l'alignement souhaité.

Cette procédure est répétée pour chaque segment.

Afin de rendre cette procédure possible, une calibration géométrique de la caméra d'observation est nécessaire de manière à prendre en compte la parallaxe. A cette fin, un certain nombre de cibles ont été placées à des positions localisées très précisément les unes par rapport aux autres (figure 6). Les positions de ces cibles en coordonnées images sont repérées à l'aide du logiciel de contrôle. Par la suite, une simple régression permet d'obtenir la transformation qui lie l'image observée par la caméra à l'image réelle de l'écran telle que vue selon l'axe optique du système. Suite à cette calibration, un lien univoque est établi entre le système de coordonnées lié à l'écran et le système de coordonnées image. Toute coordonnée pixel peut donc être liée univoquement à une coordonnée écran et inversement.

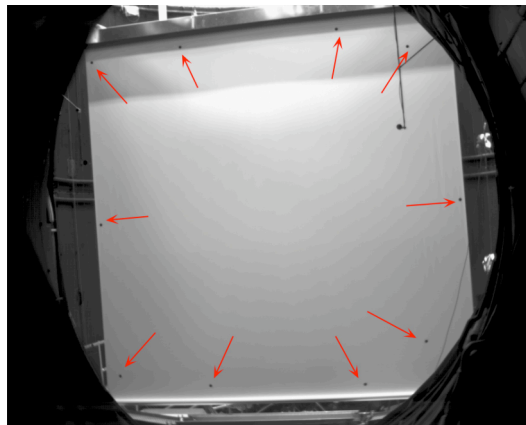


Figure 5 : Ecran muni de ses cibles de calibration tel qu'observé par la caméra. L'effet de la parallaxe est bien visible

Une étude théorique préalable a montré qu'un polynôme bi-dimensionnel d'ordre 2 avec termes croisés est largement suffisant pour établir une transformation de coordonnées précise à mieux qu'un quart de pixel caméra.

5. Mesure d'uniformité de flux

Le système d'uniformité de flux est similaire au système d'observation pour l'alignement. Le trépied, support du laser est donc retiré de la facilité. La caméra d'observation reste à la même position, mais pour être à même d'observer le flux, un filtre neutre de densité 3 est placé devant l'objectif afin d'étendre la dynamique d'observation et d'être en mesure d'acquérir une image de l'écran éclairé avec 10 constantes solaire.

Après alignement, le logiciel de contrôle acquiert une image du flux et en mesure l'uniformité. Ensuite, sur base des réponses ponctuelles de chacun des segments telles que calculées par le modèle ASAP, le logiciel effectue une optimisation des réglages et détermine les alignements complémentaires requis afin d'arriver à l'uniformité de flux demandée.

Une seconde itération de l'ensemble de la procédure doit alors être effectuée. Le système d'alignement est remis en place, le filtre neutre ôté de la caméra et chaque segment réaligné en fonction des alignements complémentaires déterminés par le logiciel.

6. Précision requise

La caméra offre une zone d'observation de 1280X1024 pixels. Elle est munie d'un objectif de 12mm de focal. La zone observée au niveau de l'écran est d'approximativement 9X7m. Un pixel représente donc approximativement une zone de 7x7mm².

Les simulations à l'aide du module d'optimisation du logiciel de contrôle ont montré qu'une erreur d'alignement d'un segment correspondant à 1 pixel caméra induit une non uniformité locale de flux inférieure à 1%. Dès lors, comme la précision requise en terme d'uniformité de flux est de 5%, une précision d'alignement de l'ordre de 1 pixel au niveau de la caméra est largement suffisante. Dans la pratique, une centroidisation est appliquée au spot laser observé et permet d'obtenir une précision de positionnement de l'ordre du quart de pixel.

7. Conclusion

Un système complet d'adaptation du simulateur solaire de l'ESTEC a été mis au point afin de pouvoir modifier la configuration actuelle et permettre l'illumination de charges utiles avec 10 constantes solaires sur un diamètre de 3m.

La modification du système consiste essentiellement au réalignement des segments de miroir constituant le réflecteur du simulateur afin de concentrer le flux sur la surface requise.

Pour ce faire, une modélisation complète de l'optique de la facilité a été réalisée sur le logiciel de « ray-tracing » ASAPTM afin de déterminer les alignements théoriques à imposer à chaque segment du réflecteur. Un système d'alignement et de mesure d'homogénéité de flux ont été mis au point permettant de réaliser rapidement le réalignement et l'optimisation du réflecteur afin d'obtenir l'éclairement souhaité avec l'homogénéité optimale dans le plan de travail.

L'ensemble permet l'optimisation ou le réalignement du simulateur solaire de l'ESTEC en quelques heures avec une précision largement supérieure à la consigne.

8. Bibliographie

1. H. Frey and A. Popovitch, « Possible Modification of ESA's Large Space Simulator to Produce a 3-metre Diameter Beam of 10 Solar Constants », 32nd International Conference on Environmental Systems, 2002, San Antonio, Texas, USA